AGN 子类的硬 X 射线光变曲线功率谱幂率指数的分布差异*

张燕，马力，杨星，毛李胜，李涛，龚云露，易庭丰
(云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500)

摘 要：基于Swift/BAT所观测的活动星系核(AGN)在硬X射线波段光变曲线数据，通过离散傅利叶变换法,分析了塞弗特1(Seyfert 1)、塞弗特2(Seyfert 2)、平谱射电类星体(FSRQ)、BL Lac天体功率谱的幂律指数（α）的分布特征。发现Seyfert 2与 I型 AGN 的α分布有显著差异,而I型AGN 各子类之间的α分布差异性不显著。Seyfert 2 的硬X射线可能来源于吸积盘内区及热冕，而Seyfert 1 的硬X射线主要来自有外流的冕。我们发现来自相对论性喷流或者外流冕的硬X射线在统计上有更大的幂律指数，而来自吸积盘热冕的硬X射线幂律指数较小。

关键词：硬X射线；活动星系核；光变曲线；幂律指数

0 引 言

活动星系核（Active Galactic Nuclei, AGN）的中心是一个超大质量黑洞，黑洞周围有一个吸积盘，在黑洞与吸积盘的共同作用下，产生准直性非常好的并且垂直于吸积盘的喷流，并产生从射电到伽马射线波段的辐射。目前流行的理论认为，I型 和 II型 AGN 是从不同角度观察的相同对象,假设中心黑洞被一团厚厚的尘埃环包围,从尘埃环的侧面观测是II型 AGN从垂直于环面方向观测来的是I型 AGN，以上便是基于视角的统一模型,此模型有较明显的各项异性[1]。因此，根据观测视角的不同,在发射线、光度、连续光谱等方面也有所不同。活动星系核大致可分为塞弗特星系、类星体、射电星系、蝎虎座BL型天体等几大类。随着观测技术的进步,我们对这几大类又有了更加细致的划分，例如按照视线方向的辐射是否被尘埃环吸收，塞弗特星系又分为 I型塞弗特星系（Seyfert 1）和II型塞弗特星系（Seyfert 2）[2]。

活动星系核的一个独特性质是在所有波段都存在光变,硬X射线的光变为我们提供了活动星系核最里面区域的信息[3]。AGN的硬X射线可以产生于吸积盘的热冕中，即软光子被盘上面的热等离子体中的电子康普顿化[4,5]，AGN 中的硬X射线的另一贡献来自于喷流中的相对论性电子同步辐射和逆康普顿散射。在这两种情况下，硬X射线的光变显示出一些不同的特征[6-15]。

Shimizu 和 Mushotzky 使用 Swift/BAT 15-150 keV 的数据，已经计算了 30 个 AGN 在硬 X 射线波段的功率谱密度（PSD），发现除了一个之外所有的功率谱可以用简单的幂律进行很好的拟合[16]。 本文利用 Swift/BAT 在硬 X 射线波段的数据对 Seyfert 1、Seyfert 2、Flat Spectrum Radio(FSRQ)、BL Lac 的功率谱进行了统计分析。我们通过拟合不同类型 AGN 的硬 X 射线 PSD 得到其幂律指数,分析活动星系核不同子类之间幂率指数的分布差异,得到硬 X 射线光变曲线的 PSD 特征与 AGN 子类有关。

1 数据样本

本研究主要的目标样本来自 Swift/BAT Hard X-ray Transient Monitor（https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/）,其中包含了 1019 个源，其硬 X 射线光变曲线有持续 14 年左右的数据，我们的研究对象主要是 AGN，所以我们从中选出了 BL Lac、FSRQ、Seyfert 1 和 Seyfert 2，该网站数据库中的 Quasar 子类都是 FSRQ。FSRQ 和 BL Lac 都属于活动星系核的子类耀变体，但是它们的吸积率以及宽线区都不一样[17]，其 X 射线的产生机制可能不一样，所以我们把它们分开研究。Table 1 为这四个子类样本个数。在这些 AGN 的光变曲线中，光子流量出现了负值，可能有这几个原因：CCD 的量子效应，热噪声和天光背景等。我们所研究的 X 射线光变曲线的功率谱的幂律指数主要与光变的特征有关，因此是否去除背景噪声对本文的分析结果的影响可以忽略不计。

表 1 样本统计

Tab.1 Sample statistics

Source type	BL Lac	FSRQ	Seyfert 1	Seyfert 2	Total
Counts	106	118	110	47	381

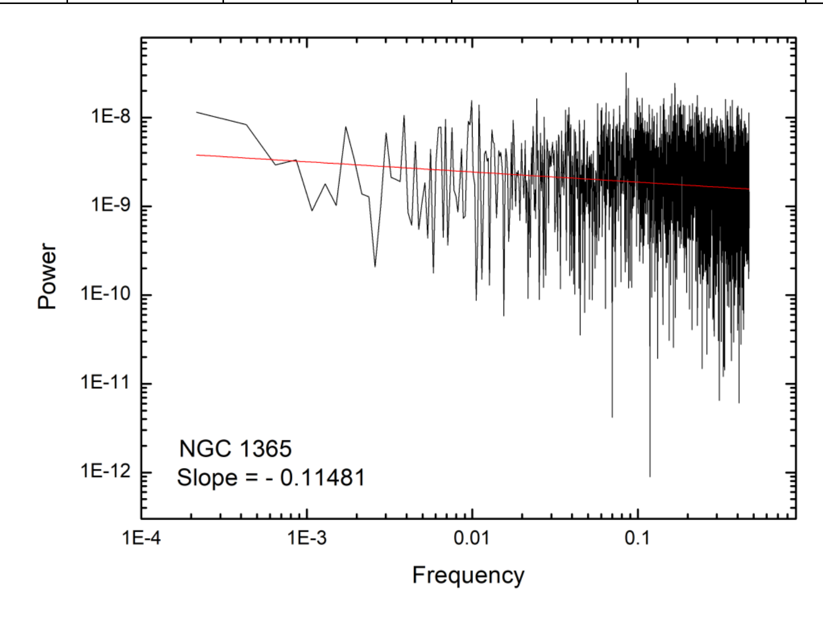


图 1 NGC 1365 功率谱在对数坐标中的线性拟合，拟合所得斜率（slope）即幂律指数 α。
Fig. 1. Linear fitting diagram of power spectrum of NGC 1365 in logarithmic coordinates, and the power law index (α) is a slope of fitting.

*基金项目：国家自然科学基金资助项目(11863007)资助，云南省高校高能天体物理重点实验室资助。
收稿日期：2019-04-? ； 修订日期：2019-05-?
作者简介：张 燕，女，硕士研究生，研究方向：活动星系核。 Email: yanzynnu@163.com

通讯作者：易庭丰，男，博士，副教授，研究方向：活动星系核。Email: yitingfeng98@163.com

2 分析方法

对这些源的光变曲线进行快速傅里叶变换（Fast Fourier transform, FFT）,得到其功率谱如图 Fig. 1（以 NGC 1365 为例），再通过线性拟合得到每个源的幂律指数(α)，并对这些不同类型源的幂律指数(α)进行统计分析，得出的结果如图 Fig. 2。

分别将 AGN 的四个子类的幂律指数统计分布图进行比较： Seyfert 2(Sy2)和 Seyfert 1(Sy1)，Seyfert 2 和 BL Lac，Seyfert 2 和 FSRQ，Seyfert 1 和 BL Lac，Seyfert 1 和 FSRQ，BL Lac 和 FSRQ；再将各子类的幂律指数累积归一化图进行比较，其比较结果如图 Fig. 2 所示，左边是幂律指数统计分布对比图，右边是幂律指数累积归一化对比图。

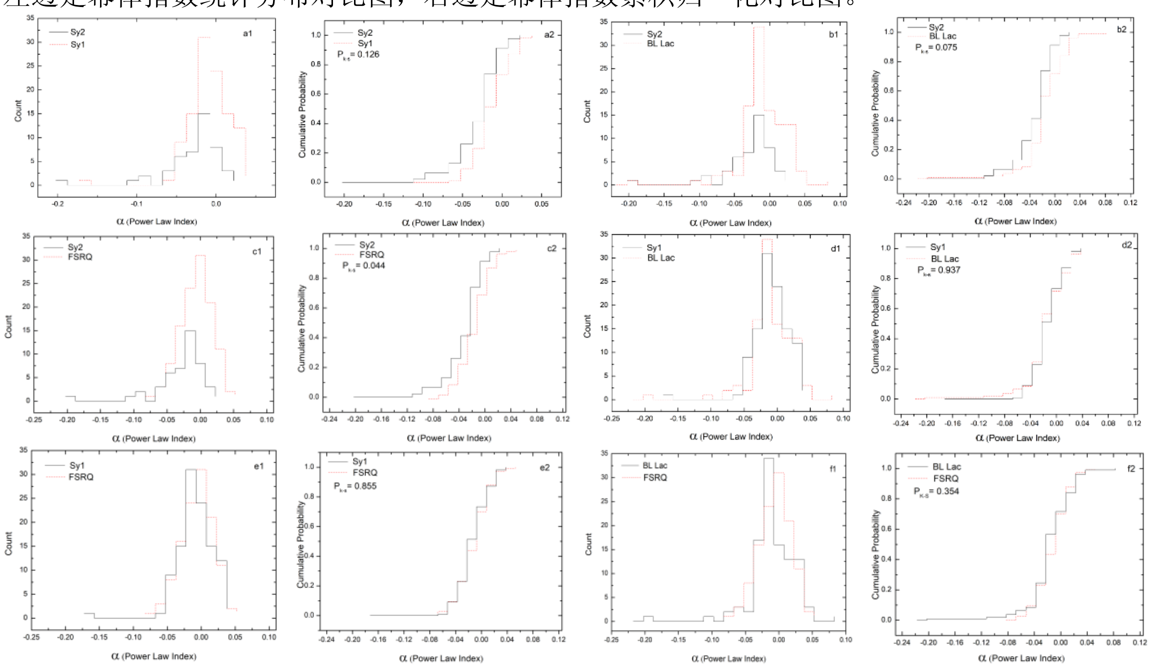


图 2 第一、三列是幂律指数分布，第二、四列是累积概率分布。

Fig. 2. The first and third columns are the power law index distributions for subclasses of AGNs, and the second and fourth columns are the cumulative probability distributions.

用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S test)来判断这两种分布的差异性，其结果如表 2 所示：

表 2:K-S 检验结果

Tab.2 The result of K-S test

K-S test between subclasses	Statistic	p-value	显著性	Panel of Fig.2
Seyfert 2 vs Seyfert 1	0.200	0.127	显著	a1
Seyfert 2 vs BL Lac	0.220	0.075	显著	b1
Seyfert 2 vs FSRQ	0.233	0.044	显著	c1
Seyfert 1 vs BL Lac	0.072	0.937	不太显著	d1
Seyfert 1 vs FSRQ	0.079	0.855	不太显著	e1
BL Lac vs FSRQ	0.122	0.354	一般显著	f1

由以上结果可知差异性非常显著的有 Seyfert 1 和 Seyfert 2、Quasar 和 Seyfert 2、BL lac 和 Seyfert 2，差异性一般显著的有 BL Lac 和 FSRQ，差异性不太显著的有 BL Lac 和 Seyfert 1、FSRQ 和 Seyfert 1.

3 结论与讨论

本文主要收集了 381 个 AGN，对这些 AGN 的硬 X 射线观测数据的光变曲线进行快速傅里叶变换分析，统计 AGN 各子类的功率谱幂律指数（α）分布情况，用 K-S 检验来判断其差异显著性，分析结果如 Table 2 所示，Seyfert 2 这类有尘埃环遮挡的 II 型活动星系核与 BL Lac、FSRQ、Seyfert 1 这类没有尘埃环遮挡的 I 型活动星系核差异性显著。

活动星系核的硬 X 射线辐射的能谱成份很复杂，主要有两种可能的来源，一是来自喷流，例如耀变体其具有相对论性喷流且喷流视角较小，因此集束效应较强，观测到的辐射主要来自于喷流；二是来自吸积盘的内区及热冕[18, 19]（例如 Seyfert 星系）。活动星系核的 X 射线辐射是喷流主导还是冕主导的，会呈现出不同的辐射特征。实际观测的硬 X 射线辐射流量多是两者的混合，不同类型的 AGN 可能会有不同的混合比例。Seyfert 星系作为活动星系核的低光度子类，它的盘冕模型表明吸积盘中的软光子在冕区被热康普顿散射而转化为更高能量的 X 射线光子，这个过程很好地解释了 Seyfert 星系的 X 射线光谱能用一个幂律谱拟合的现象。最近的研究也表明活动星系核冕中的 X 射线辐射是中等程度地各向异性的，这表明冕的形状是两极突出的长条形，并且伴有外流（ 速度约为 0.3-0.5 倍光速）[20]。Seyfert 1 与 Seyfert 2 的 X 射线辐射的差异可能主要是因为冕的各向异性而不是尘埃环的吸收，Seyfert 1 星系的硬 X 射线主要来自伴有外流的冕（outflowing coronae）[20]。在吸积率小于某个临界值（10^{-6}倍爱丁顿吸积率）的低光度活动星系核的 X 射线辐射更可能来自喷流而不是径移主导的吸积流（advection-dominated accretion flow, ADAF）[21]。根据 AGN 统一模型，一般而言，I 型 AGN 的硬 X 射线辐射来自相对论性自喷流或者伴有外流的冕，具有各向异性；而 II 型 AGN 的硬 X 射线辐射来自吸积盘的热冕，且有吸收。

因此，我们所得到的硬 X 射线光变曲线的功率谱幂律指数的分布差异可以得到解释：来自相对论性喷流或者外流冕的硬 X 射线因为多普勒效应而在统计上有更大的幂律指数（α），而来自吸积盘热冕的硬 X 射线幂律指数较小。我们可以把硬 X 射线光变幂律指数（α）的分布特征差异作为活动星系核 I 型和 II 型分类统计上的新判据。

参考文献:

[1] Urry C M, Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715):803-845.

[2] 黄克谅. 类星体与活动星系核[M]. 中国科学技术出版社, 2005.

[3] Soldi S, Beckmann V, Baumgartner W H, et al. Long-term variability of AGN at hard X-rays[J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 563: 57(16 pp).

[4] Haardt F, Maraschi L. X-ray spectra from two-phase accretion disks[J]. Astrophysical Journal, 1993, 413: 507(11 pp).

[5] McHardy I, Lawson A, Newsam A, et al. Simultaneous X-ray and infrared variability in the Quasar 3C273 - II. Confirmation of the correlation and X-ray lag[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 375: 1521(7 pp).
[6] Arevalo P, McHard I M, Summons D P. X-ray variability of the Seyfert 1 Markarian 335: power spectrum and time lags[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 388: 211(8 pp).
[7] Czerny B, Nikolajuk M, Piasecki M, et al. Black hole masses from power density spectra: determinations and consequences[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, 325: 865(10 pp).
[8] McHardy I M, Koerding E, Knigge C, et al. Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes[J]. Nature, 2006, 444: 730(3 pp).
[9] Uttley P, McHardy I M. X-ray variability of NGC 3227 and 5506 and the nature of active galactic nucleus 'states'[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 363: 586(11 PP).
[10] Soldi S, Türler M, Paltani S, et al.The multiwavelength variability of 3C 273[J]. Astronomy and Astrophysics, 2008, 486: 411(16 pp).
[11] Bell M E, Tzioumis T, Uttley P, et al. X-ray and radio variability in the low-luminosity active galactic nucleus NGC 7213[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 411: 402(9 pp).
[12] Zoghbi A, Fabian A C, Uttley P, et al. Broad iron L line and X-ray reverberation in 1H0707-495[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 401: 2419(14 pp).
[13] Caballero-Garcia M, Papadakis I, Ajello M, et al. Hard X-ray spectral variability of the brightest Seyfert AGN with SWIFT/BAT[C]. The X-ray Universe 2011, Presentations of the Conference held in Berlin, Germany, 27-30 June 2011.
[14] Uttley P, McHardy I M, Papadakis I E. Measuring the broad-band power spectra of active galactic nuclei with RXTE[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 332: 231(20 pp).
[15] Papadakis I E. The scaling of the X-ray variability with black hole mass in active galactic nuclei[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, 348: 207(7 pp).
[16] Shimizu T T, Mushotzky R F. The First Hard X-Ray Power Spectral Density Functions of Active Galactic Nucleus[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 770: 60(21 pp).
[17] Ghisellini G, Maraschi L, Tavecchio,F. The Blazar's Divide and the Properties of Fermi Blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 396: L105(5 pp).
[18] Kamraj N, Fabian A, Lohfink A, et al. Probing the Physical Properties of the Corona in Accreting Black Holes[J]. arXiv:1903.05241, 2019.
[19] Antonucci R. Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasar[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1993, **31** (1): 473–521.
[20] Liu T, Wang J X, Yang H, et al. Are X-Ray Emitting Coronae around Supermassive Black Holes Outflowing[J]? The Astrophysical Journal, 2014, 783: 106(14 PP).
[21] Yuan F, Yu Z, Ho, L C. Revisiting the "Fundamental Plane" of Black Hole Activity at Extremely Low Luminosities[J]. The Astrophysical Journal, 2009, 703: 1034(10 PP).

Differences in Power Law Index Distribution of Hard X-ray Light Curves of AGN Subclasses

Yan Zhang, Li Ma, Xing Yang, Li-Sheng Mao, Tao Li, Yun-Lu Gong, Ting-Feng Yi

(College of Physics and Electronics，Yunnan Normal University，Kunming，China，650500)

Abstract: Based on the hard X-ray light curve data of Active Galactic Nucleus (AGNs) observed by Swift/BAT, the distribution characteristics of power law index (α) of the power spectral density of Seyfert 1s, Seyfert 2s, flat spectrum radio quasars (FSRQs) and BL Lac objects are analyzed by Fast Fourier Transform method (FFT). It was found that the index α distribution of Seyfert 2s was significantly different from that of type I AGNs (Seyfert 1s, FSRQs and BL Lac objects). The index α distribution of the subclasses of type I AGNs have not significant difference between each other. Therefore, we concluded that the hard X-rays of Seyfert 2s mainly come from the inner region of the accretion disk or Corona, and other AGN subclasses mainly come from the jet and outflowing corona. We found that the hard X-ray from the jet or outflowing corona has a larger α, while the hard X-ray from the thermal coronae of the inner region of the accretion disk has a smaller α.

Key words: Hard X-ray; Active Galactic Nucleus; Light Curve; Power Law Index